干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1961—2019年乌鲁木齐市暴雪环流分型及其成因分析

李桉孛[1,2]， 万 瑜[1]， 张 俊[1]， 李如琦[1]， 芒苏尔·艾热提[1]， 李 娜[1]
(1. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 成都信息工程大学大气科学学院，四川 成都 610225)

摘 要：利用1961—2019年降雪期乌鲁木齐市5个国家气象站日降水资料、NCEP逐日4次0.25°×0.25°和1°×1°再分析资料，统计分析乌鲁木齐市暴雪特征及大尺度环流形势，归纳出现暴雪的3种典型环流类型，并分别选取典型个例进行诊断和对比分析。结果表明：(1) 乌鲁木齐市暴雪发生频率以0.3次·(10a)$^{-1}$趋势上升，具有准20 a振荡周期，发生次数最多为3月(40%)，11月次之(32%)。(2) 乌鲁木齐市暴雪分为槽前西南气流型、高空槽东移型和强锋区型，强锋区型比例最高但降雪量小，槽前西南气流型持续时间长且降雪量最大，高空槽东移型最少但影响面积更大且雪强更强。(3) 乌鲁木齐市暴雪的主要影响系统为300 hPa极锋急流、500 hPa偏西或西南气流、700 hPa低空偏北急流和850 hPa西北气流。(4) 形成乌鲁木齐市暴雪的机制为低层偏北气流遇山堆积迫使暖湿空气抬升形成"冷垫"，并与500 hPa以上西南气流形成强垂直风切变和深厚的锋生区，但因三类过程强锋生维持时间和锋面斜率与伸展高度的不同使产生暴雪的原因有明显差异。(5) 暴雪的水汽输送主要为西南、偏西和西北路径，槽前西南气流型和高空槽东移型在西南气流引导下直接输送至暴雪区上空，强锋区型则由水汽的接力输送形成水汽汇合。本研究对乌鲁木齐市暴雪天气系统结构特征进行了分类和归纳，为预报服务提供有效参考依据。

关 键 词：暴雪；环流分型；锋生函数；水汽输送；乌鲁木齐市
文章编号：

暴雪天气往往给交通运输及农牧业生产带来极大影响。中国主要降雪区域为东北、天山北部、青藏高原和长江中下游及华北地区，在20世纪90年代新疆北部、东北北部的降雪发生了由少到多的突变，且增加趋势显著[1-2]，其中暴雪的年代际和年际变化与大气环流、北极海冰及水汽收支存在较好的相关性[3-4]。对东北暴雪的统计及典型个例分析表明，北上温带气旋引发的东北暴雪环流可分三类，低涡型和深槽型暴雪气旋为东北路径，浅槽型为偏东路径，不同路径造成的暴雪分布有明显差异[5]，局地暴雪出现频次远远高于大范围暴雪和区域暴雪[6]，冬末春初出现大雪和暴雪的概率最高[7]，辽宁省冬季区域暴雪的发生是经向水汽异常输送的结果[8]，近地面锋区坡度陡、低层上升动力和水汽辐合强，利于降水增强，850 hPa锋区过境缓慢导致降雪持续时间长[9]。针对华北地区暴雪的研究，集中于对个例的诊断分析，结果表明华北暴雪多为回流型降雪，低层回流不仅对水汽有贡献，还能形成冷空气垫，利于西南暖湿气流的爬升，加强地面的动力抬升作用，增强垂直运动[10-12]，且高、低空急流的耦合作用也对动力抬升和水汽汇合有重要贡献[13]。新疆学者对北疆暴雪也取得了许多研究成果，按暴雪落区可将北疆暴雪划分为北疆西部及北疆沿天山型、北疆北部及东部型、北疆西部及西天山型[14]，统计表明1959—2009年新疆北部强降雪的4个高发区为伊犁河谷、塔额盆地、北疆沿天山一带和阿勒泰地区，频次呈现增加趋势[15-18]，高、中、低空三支气流的完美配置是暴雪发生的动力抬升与水汽输

收稿日期：2021-05-08； **修订日期**：2021-06-15
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0102)；国家重点研发计划"重大自然灾害监测预警与防范"专项(2019YFC1510501)资助
作者简介：李桉孛(1992-)，女，工程师，本科，主要从事灾害性天气机理研究. E-mail: 634200781@qq.com
通讯作者：李如琦(1974-)，男，正高级工程师，硕士，主要从事天气预报和灾害性天气机理研究. E-mail: liruqi@sohu.com

送关键，最强水汽输送层位于650~750 hPa之间，低空急流越强，水汽输送贡献越大[14,17-18]。然而目前尚未有对乌鲁木齐市暴雪的统计和分型研究，在水汽路径、动力热力条件、中尺度特征演变等方面未建立系统的概念模型，已开展的研究以个例分析为主，500 hPa南支系统携带水汽沿西南气流向新疆输送且与高空偏西或西南气流的叠加有利于乌鲁木齐市出现暴雪，但因不同尺度天气系统移速与位置不同，暴雪强度、落区也有所不同[19-22]，很难精准预报，少量的个例分析也并不能满足对乌鲁木齐市暴雪的认识和研判，需要对乌鲁木齐市暴雪天气高低空配置进行系统性的分类和归纳。

本文统计1961—2019年乌鲁木齐市逐日降雪量，对53次暴雪过程的特征与大尺度环流背景进行分析和归纳，将乌鲁木齐暴雪影响系统分类，并对不同类型暴雪的高低空配置进行合成分析，旨在总结乌鲁木齐市暴雪天气的系统结构特征，梳理预报思路，为预报服务提供有效参考依据。

1 资料来源

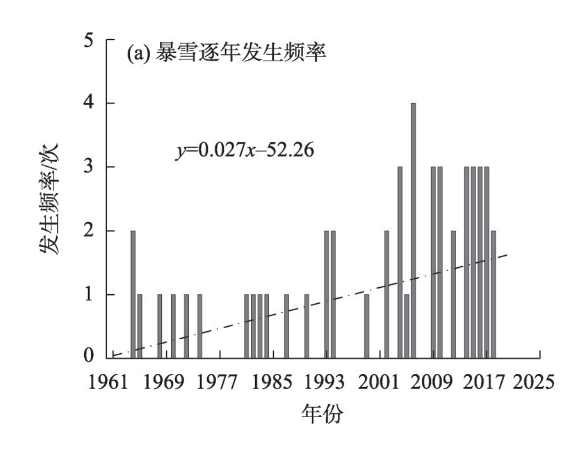
本文利用全国综合气象信息共享平台（CIMISS）提供的1961—2019年冷季（11月—次年3月）乌鲁木齐市5个国家站20:00—次日20:00的24 h降雪量和常规观测数据集（该数据集经过严格的质量控制，准确性及完整性满足此次研究需求）以及美国气象环境预报中心（NCEP）空间分辨率为0.25°×0.25°和1°×1°的全球再分析资料，通过大气环流特征对近59 a暴雪天气的影响系统进行分类，并计算整层水汽通量与各层次水汽通量和散度、垂直速度、假相当位温、湿位涡等物理量，分析乌鲁木齐市不同类型暴雪的系统结构特征。

文中采用新疆降水量级标准（修订版）规定：24 h降雪量（R），$R \geqslant 12.1$ mm 为暴雪[23]，并按照中国气象局评分办法（气发［2005］109号），当出现雨转雪时，积雪深度增加10 cm以上的也认为是暴雪。

2 暴雪统计特征

章诞武等[1]分析发现中国主要降雪区域年降雪量呈显著增加趋势且表现出较为明显的年代际变化。从1961—2019年乌鲁木齐市暴雪逐年发生频率统计可以得出，随着气候增暖其降雪量和暴雪日数及发生频率均呈增加趋势，频率递增系数为0.3次·(10a)$^{-1}$。2002—2018年年平均发生暴雪约2次，其中2006年出现暴雪最多达4次，是近59 a乌鲁木齐市降水极端偏强年。乌鲁木齐市1961—2019年有29 a暴雪日数为0，其中1975—1980年和1995—1998年连续多年未出现暴雪天气，具有明显准20 a振荡周期（图1a）。

从乌鲁木齐市暴雪逐月分布特征可以看出，暴雪在11月和3月频发，呈现双峰特征，其中3月为最多，达21次，占40%，11月次之为17次，占32%，2、11月分别为7次和6次，占13%和11%，1月发生概率较小为2次（图1b）。分析其原因主要是12月—次年2月新疆北部受冷高压控制明显，少有暖湿气流输送，而11月和3月槽脊活动频繁且冷暖空气交汇剧烈，有利于强降雪产生，这与孙秀忠等[2]、庄晓翠等[17]研究发现的中国北方及北疆沿天山一带暴雪多出现在初冬和早春，而隆冬暴雪相对较少的结



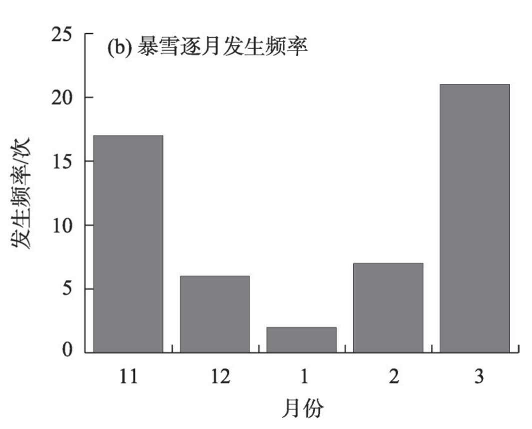


图1 1961—2019年乌鲁木齐市暴雪逐年、逐月发生频率

Fig. 1 Annual and monthly frequency of snowstorm in Urumqi City from 1961 to 2019

论一致。乌鲁木齐市暴雪的旬差异较小，旬发生频次为17~19次。

3 天气学分型

依据500 hPa环流形势对1961—2019年乌鲁木齐市53次暴雪个例进行天气学分型，分别为槽前西南气流型（Ⅰ型）、低槽（涡）东移型（Ⅱ型）和强锋区型（Ⅲ型）3种类型。表1给出11月—次年3月不同环流型下各月和累计的发生次数，统计结果表明，强锋区型发生次数最多，为20次，占总暴雪次数的38%，累计降雪量相对较小；槽前西南气流型和低槽（涡）东移型分别为16次（30%）和17次（32%），槽前西南气流型降雪量最大，低槽（涡）东移型影响范围最大，平均每次超过2站。1月各型发生次数均最少，仅Ⅰ型发生2次；Ⅰ型暴雪的月分布较平均；Ⅱ型和Ⅲ型暴雪主要集中在3、11月，其他月份很少，其原因为上述两型降雪量大需更多的水汽辐合和更强的冷暖交汇，季节转换时期更容易达到出现两类暴雪的条件。由于每一种环流类型造成的暴雪个例较多，为突出分析的代表性，各类型分别选取4次典型暴雪过程进行合成分析，过程选取如表1所示。

3.1 槽前西南气流型

此型暴雪前期500 hPa（图2）欧亚范围中高纬呈“两脊一槽”经向环流，欧洲沿岸和贝加尔湖为高压脊，西西伯利亚为低涡，乌拉尔山至咸海为长波槽，中纬度多短波活动，上游脊前偏北急流强，引导新地岛冷空气南下向槽内补充，长波槽不断加深，乌拉尔山长波槽与中纬度短波槽同位相叠加，使该槽经向度进一步加大并南伸，槽前西南气流加强，将阿拉伯海水汽源源不断向北输送至暴雪区，随着欧洲脊东移减弱，在下游脊的阻挡下，乌拉尔山大槽前西南气流上短波东移北收造成暴雪天气过程。

暴雪发生过程中，200~500 hPa为强盛的西南气流，暴雪区处于新疆西部至贝加尔湖北部的高空西南急流入口区右侧，有正涡度平流引起辐散，抽吸作用加剧，地面气流辐合促使上升运动加强；500 hPa新疆北部处于低槽前部西南暖湿气流中；700 hPa北疆大部通常为西北气流控制而后分为两支，其中一支西北气流受阿尔泰山阻挡，转向同时风速加强；一支东北急流于北塔山至乌鲁木齐市形成，暴雪区处于西北气流前部和东北急流出口区之间的气旋性切变区；850 hPa北疆地区受西北气流控制，低层偏北风在天山北坡的阻挡下，地形强迫抬升作用明显，产生地形辐合，增强垂直运动并与中高层西南气流形成垂直风切变。

对2015年12月11日过程作具体诊断分析可知，暴雪发生时乌鲁木齐市上空垂直速度区随高度升高向后倾斜，乌鲁木齐市东侧有低层辐散、高层辐合的强下沉运动区，气流在乌鲁木齐市西侧上升后受中高层西风影响转为偏西气流，而后又在东侧受下沉运动影响，从而形成较强的垂直次级环流，利于暴雪的发生发展。假相当位温θ_{se}场能够较好地反映锋区的位置与垂直结构，锋生函数F则显示锋生锋消和锋面强度变化，二者结合分析有利于进一步得出乌鲁木齐市暴雪的抬升触发机制，沿87.5°E作θ_{se}与F的垂直剖面（图3a），10日08:00等θ_{se}线水平梯度逐渐增大并在43°~44°N之间形成密集带，43°N以西地面至650 hPa西北气流携带干冷空气受地形强迫在天山北坡堆积形成“冷垫”，中高层偏南气流引导暖湿空气沿“冷垫”爬升至700 hPa以上，43°N以东有风随着高度顺时针旋转体现了锋前暖平流；14:00降雪开始，低层西北风与中高层偏南风风速的加大增强了风场辐合及垂直切变，有利于乌鲁木齐市西侧垂直上升运动加强，随着冷空气不断加强和

表1 1961—2019年乌鲁木齐市各类暴雪分型统计

Tab. 1 Statistics of various types of snowstorm in Urumqi City from 1961 to 2019

环流类型	总次数/次	逐月发生次数/次					典型个例日期(年-月-日)
		11月	12月	1月	2月	3月	
槽前西南气流型（Ⅰ型）	16	4	4	2	3	3	2013-11-20，2014-12-08 2015-12-11，2018-12-01
低槽（涡）东移型（Ⅱ型）	17	6	1	0	1	9	2015-02-13，2016-11-05 2017-12-28，2018-03-18
强锋区型（Ⅲ型）	20	7	1	0	3	9	2004-03-26，2006-03-30 2010-03-21，2017-02-20

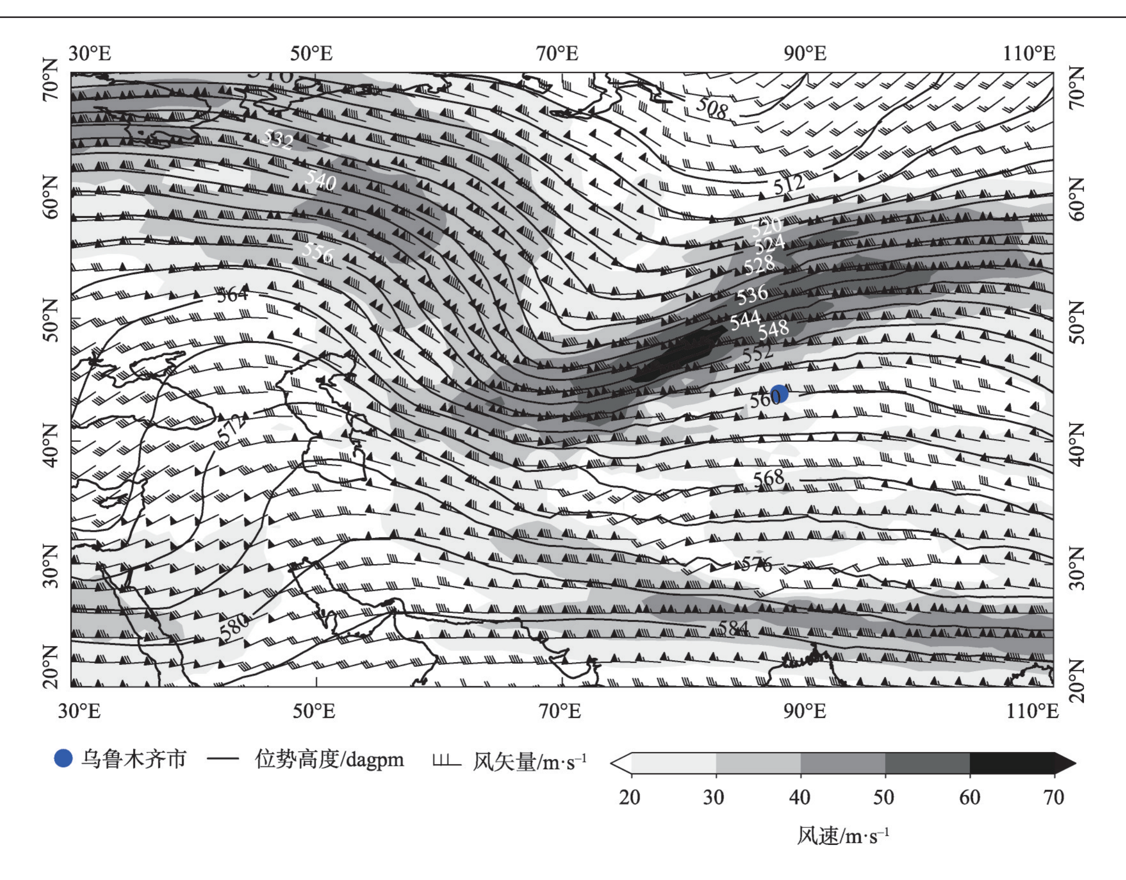


图2　乌鲁木齐市4次槽前西南气流型暴雪500 hPa合成位势高度场

Fig. 2　500 hPa average geopotential height field of 4 cases of snowstorm with southwest airflow in front of trough in Urumqi City

堆积，锋区也明显加强，600 hPa以下等θ_{se}线抬升形成较强的密集而陡立的带状区域，锋前暖湿气流在爬升过程中凝结潜热释放使空气增暖，θ_{se}梯度加大从而引起锋生愈强；11日02:00偏北气流加强为急流，锋面伸展至550 hPa，强锋生抬升至650 hPa，中心强度达13×10^{-14} K·m^{-1}·s^{-1}，上升运动增强，使降水进一步发展，乌鲁木齐市小时雪强持续大于2 mm·h^{-1}；11日14:00锋面高度降低，强锋生区回落至700 hPa及以下，锋强减弱，对应雪强明显减小，但由于高空影响系统移速缓慢，西北气流补充的冷空气与43°N以东稳定的暖气团不断交汇，降雪维持时间较长，过程累积降雪量大。

从1000~300 hPa整层的垂直积分水汽通量矢量图（图3b）上得知，水汽的主要源地位于高纬度的巴伦支海、中纬度的里海、咸海和低纬度的阿拉伯海，分析可知，暴雪前500 hPa低槽南伸，槽前强盛的西南气流引导阿拉伯海水汽直接向暴雪区上空输送，在700~850 hPa偏西气流的引导下，水汽分别由经里海、咸海、巴尔喀什湖直接输送和经塔城地区北部、阿勒泰地区而后在阿尔泰山阻挡下沿东北气流输送两条路径不断向暴雪区汇集，此时低层较强的水汽输送伴随明显的水汽辐合。降雪发生前，地面至550 hPa之间存在明显的水汽辐合，最强水汽辐合值约-16×10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}，当水汽辐合层厚度降低至800 hPa以下且强度减弱后，降雪达到最强（图略）。

3.2　低槽(涡)东移型

此环流类型引发的乌鲁木齐市暴雪主要由于低槽（涡）东移型，根据影响系统经向度的不同，可划分为：小槽东移类和经向槽东移类。由小槽东移造成的暴雪有8次，占此类暴雪总次数的47%，由经向槽东移引发的暴雪有9次，占53%，两类较为平均。

此型暴雪前期500 hPa（图4）欧亚范围中高纬呈“三槽两脊”经向环流，东欧和贝加尔湖地区为高压脊，乌拉尔山为一个东北—西南向低槽，欧洲东部和鄂霍次克海为低涡，中亚地区多短波活动，引导阿拉伯海水汽向北输送至新疆西部上空，欧洲东部低涡发展东移使新疆上游脊东南衰退，乌拉尔山低槽南部与中纬度短波结合，槽底加深至40°N以南并快速自西向东移动造成乌鲁木齐市暴雪天气。

暴雪发生过程中，200~500 hPa同样为强盛的西

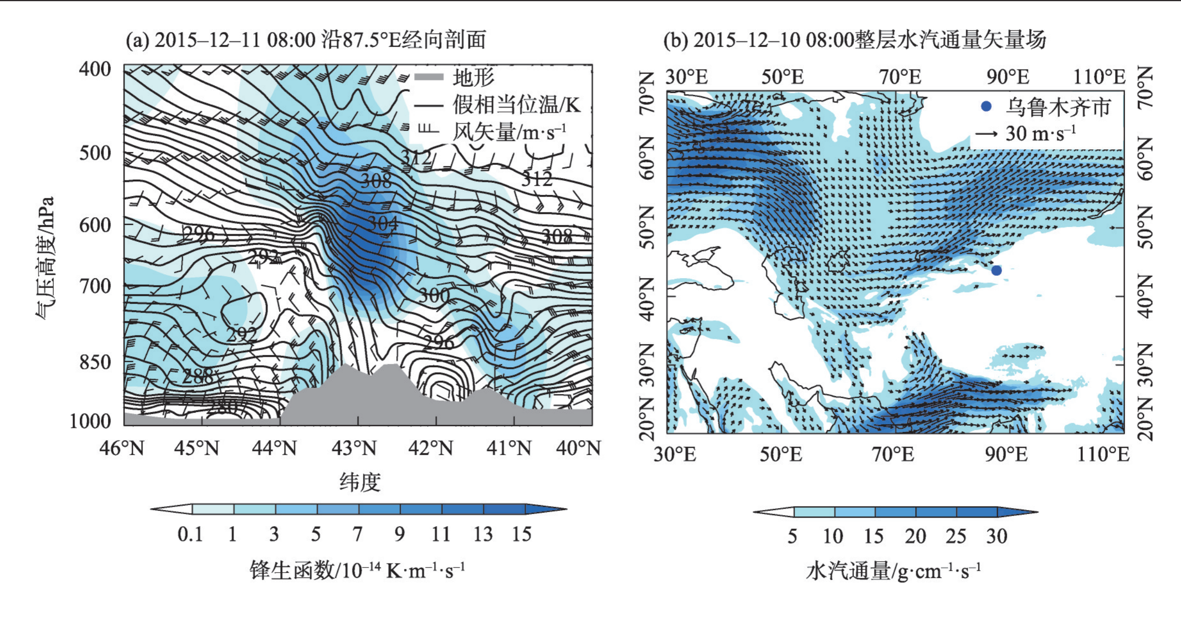


图3　暴雪区垂直结构及水汽输送

Fig. 3　Vertical structure and water vapor transportation of the snowstorm area

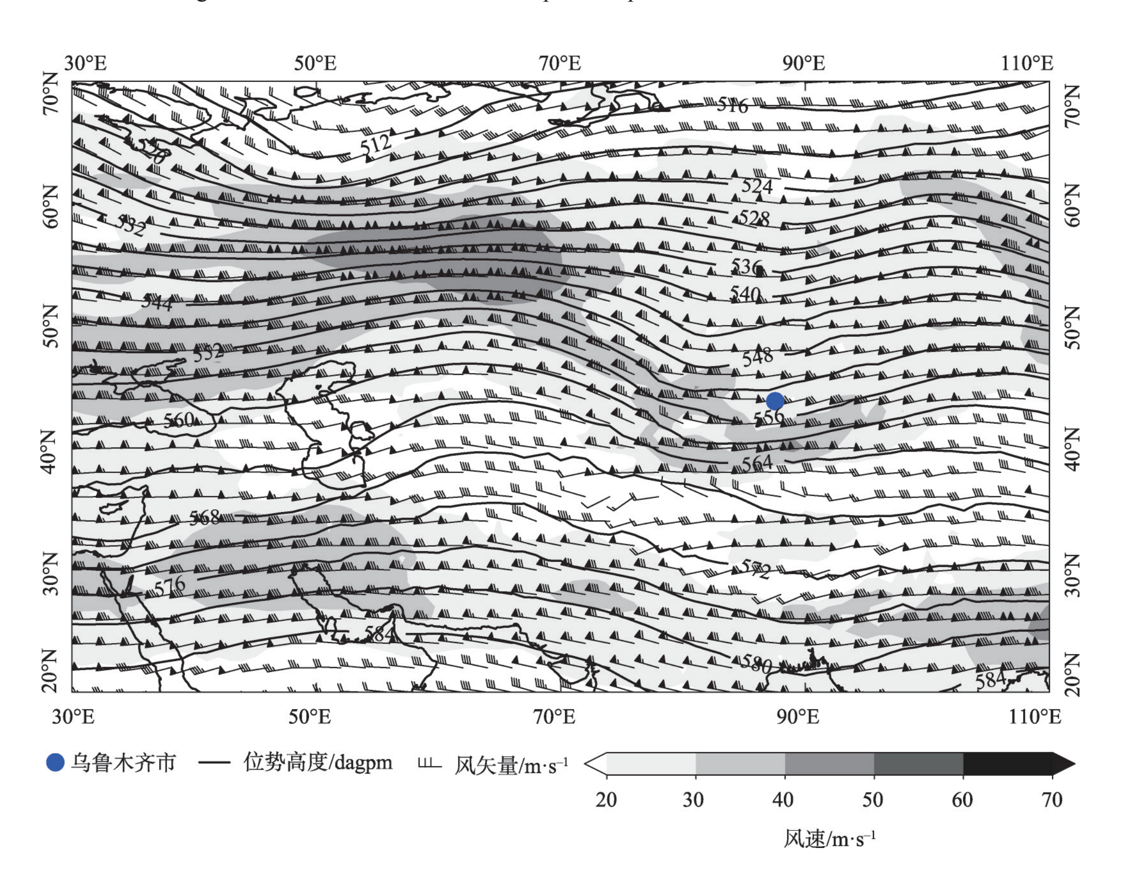


图4　乌鲁木齐市4次低槽(涡)东移型暴雪500 hPa合成位势高度场

Fig. 4　500 hPa average geopotential height field of 4 cases of snowstorm with trough (vortex) eastward in Urumqi City

南急流，300 hPa急流核>50 m·s^{-1}，暴雪区处于巴州至贝加尔湖西部的高空西南急流入口区右侧风速达42 m·s^{-1}，有正涡度平流引起辐散，抽吸作用加剧，地面气流辐合促使上升运动加强，500 hPa先于300 hPa 12 h出现西南急流，具有明显后倾结构，新疆北部处于低槽前部>20 m·s^{-1}的西南暖湿气流中，700~850 hPa前期乌鲁木齐市处于西北风与偏南风辐合线前侧，随着冷空气从低层进入，北疆大部为西北气流控制，而后塔城北部至乌鲁木齐市一线风速快速加强达到急流强度，暴雪区处于低空西北急

流出口区。

分析2016年11月5日暴雪过程的动力和水汽特征可知，暴雪发生时散度与垂直速度的分布与“12·11”过程近似，乌鲁木齐市上空的散度负值（辐合）中心强度更强，较强的耦合作用使上升运动发展剧烈，2个垂直速度正值（上升运动）中心也更强。θ_{se}与F的垂直剖面（图5a）表现为等θ_{se}线水平梯度自4日14:00—20:00迅速增大达到最强，锋面抬升至500 hPa，43°~44°N之间的带状区域较“12·11”过程更密集且陡立，形成了更加深厚的锋面结构，850~700 hPa西北急流核中心强度达24 m·s^{-1}，43°N以西地面至550 hPa更强的偏北风加剧了乌鲁木齐市西侧的垂直上升运动，携带的冷空气自北向南楔入与500 hPa西南暖湿气流和43°N以东暖气团的剧烈对峙也使得锋生进一步加强，最强锋生区抬升高度达550 hPa，中心强度15×10^{-14} K·m^{-1}·s^{-1}，乌鲁木齐市降雪强度更强，20:00雪强达4.1 mm·h^{-1}，但受高空系统快速东移影响，强降雪维持时间较短。

1000~300 hPa整层的垂直积分水汽通量矢量（图5b）表明此次水汽的主要源地位于中纬度的黑海、里海、咸海和低纬度的阿拉伯海，中纬度偏西路径水汽输送贡献率较低纬度更大，前期南支槽位置偏南，低槽前的西南气流不断将阿拉伯海的水汽经中亚地区向北输送到新疆附近。从各层水汽通量上发现，暴雪发生前500 hPa中亚低槽位置偏南，在西南气流引导下阿拉伯海水汽向北输送，而后南北两支系统叠加快速东移，使得水汽沿槽前西南气流向暴雪区上空输送，水汽辐合，700~850 hPa与“12·11”过程具有一定相似性，均为偏西和偏西转东北两条水汽路径。降雪发生前地面至600 hPa之间存在明显的水汽辐合并随高度的降低而增大，最强水汽辐合值达−35×10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}，当强度减弱时，降雪最强（图略）。

3.3 强锋区型

此型暴雪前期500 hPa（图6）欧亚范围中高纬呈“两脊两槽”经向环流，欧洲和贝加尔湖西侧为高压脊，乌拉尔山和我国东北地区为低槽，中纬度中亚地区多短波活动，由于贝加尔湖西侧高压脊阻挡，同时乌拉尔山低槽振幅大移速缓慢，而中亚低槽移速较快，乌拉尔山低槽底部有较强偏西偏北气流与中亚短波槽前西南暖湿气流在巴尔喀什湖附近汇合东移，槽前锋区明显加强并南压在天山北坡造成此次乌鲁木齐市暴雪。

暴雪发生过程中，200~300 hPa暴雪区处于伊犁河谷至蒙古国西部的高空西南急流入口区右侧，风速最大达54 m·s^{-1}，有正涡度平流引起辐散，抽吸作用加剧，500 hPa巴尔喀什湖低槽前有冷平流输送，中亚低槽有暖平流，两支气流携带的冷暖空气在天山北坡剧烈交汇，700~850 hPa巴尔喀什湖至乌鲁木齐市存在一支较强的西北急流直抵天山北坡，暴雪区处于低空西北急流出口区，受天山地形辐合抬升作用明显，且$T-T_d \le 5$ ℃存在饱和湿区堆积于此处。

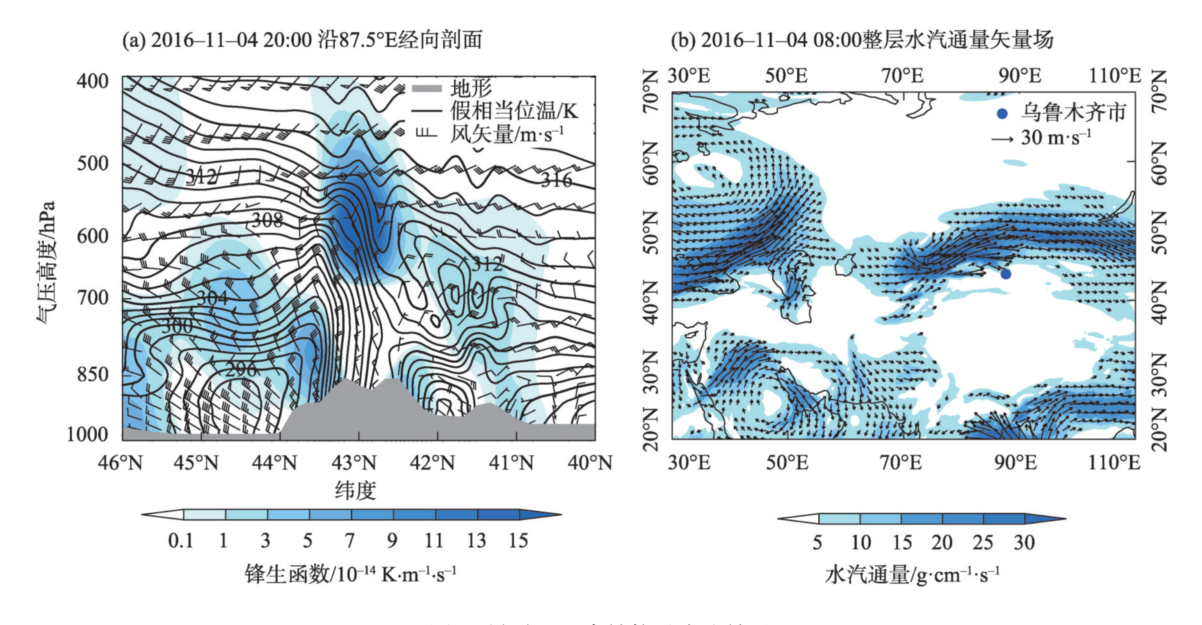


图5 暴雪区垂直结构及水汽输送

Fig. 5 Vertical structure and water vapor transportation of the snowstorm area

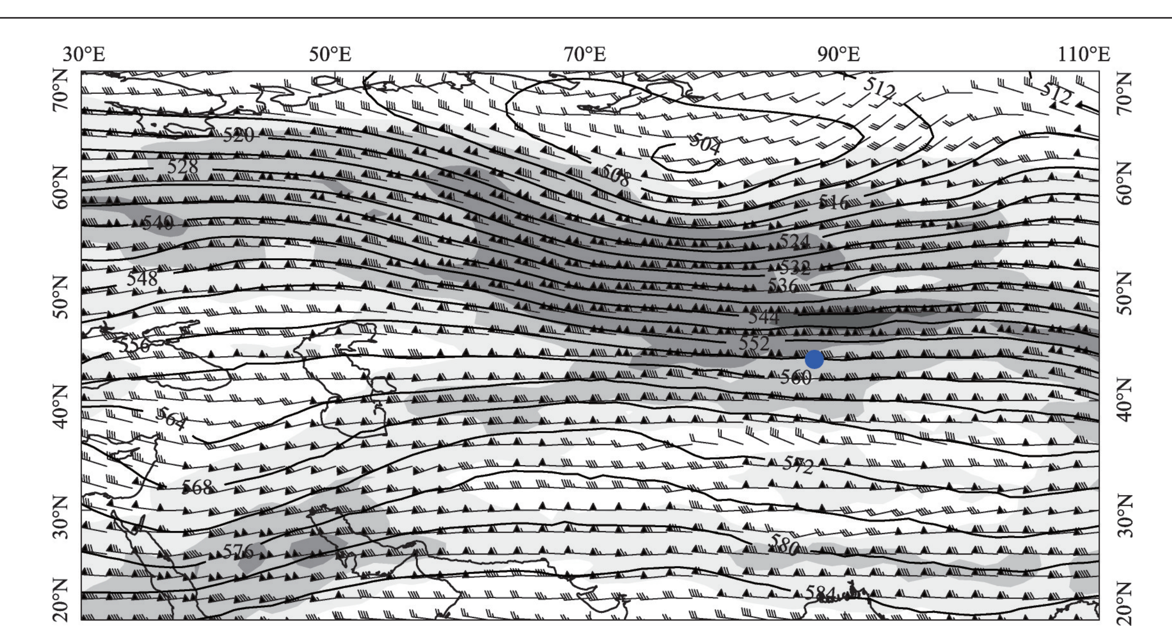


图6　乌鲁木齐市4次强锋区型暴雪500 hPa平均合成位势高度场

Fig. 6　500 hPa average geopotential height field of 4 cases of snowstorm with strong front area in Urumqi City

分析强锋区型个例中2017年2月20日暴雪过程可知，暴雪发生时高层辐散、低层辐合的高低空配置下，由次级环流引起的抽吸作用有利于垂直运动发展，500 hPa以下天山北坡88°以西上空均有较强的上升运动，表明遇山后受地形影响存在强迫抬升，其中最大上升运动区位于700~850 hPa。θ_{se}与F的垂直剖面(图7a)与“11·5”过程更为相似，表现为等θ_{se}线6 h由地面快速抬升到500 hPa，水平梯度大，锋面结构明显，降雪开始时为550 hPa以下强盛的偏北气流而中高层以西南气流为主，但500 hPa乌鲁木齐市受低槽底部强锋区影响，西南气流显然较弱，因此引起强锋生的主要原因是前期中亚低槽南伸经向度增大，西南气流不断输送暖湿空气翻山至天山北坡而增暖增湿，最强锋生区高度为550 hPa，

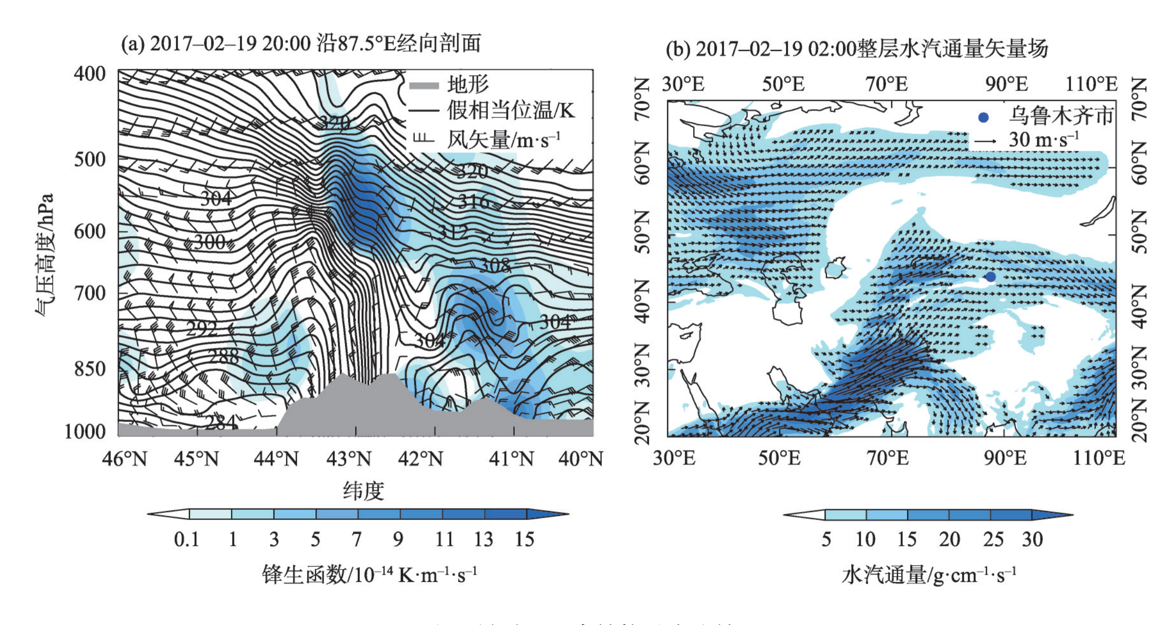


图7　暴雪区垂直结构及水汽输送

Fig. 7　Vertical structure and water vapor transportation of the snowstorm area

中心强度15×10^{-14} K·m^{-1}·s^{-1}，乌鲁木齐市最大小时雪强为2.8 mm·h^{-1}，由于缺少西南暖湿气流的补充，中层强锋生维持时间较短，降雪减弱结束更快。

从1000~300 hPa整层的垂直积分水汽通量矢量图（图7b）得知，此次水汽的主要源地位于阿拉伯海，由于中亚低槽位置偏南，低槽前的西南气流不断将阿拉伯海的水汽经中亚地区向北输送到新疆西部，而持续的强偏西气流同时又将水汽沿45°N向东输送至暴雪区上空。分析各层水汽通量可以看出，前期500 hPa中亚低槽经向度大，槽前西南气流不断将阿拉伯海的水汽向北输送至巴尔喀什湖附近，紧接着与槽底强锋区的偏西急流以及700~850 hPa经里海、咸海沿偏西和西北气流引导的水汽汇合，共同向天山北坡聚集。降雪发生前地面至300 hPa之间为深厚的水汽通量散度负值区（辐合），强水汽辐合区位于600 hPa以下，最强水汽辐合值约 −12×10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}，当水汽辐合层厚度快速集中至800 hPa以下，降雪达到最强（图略）。

4 结 论

本文依据500 hPa环流形势对1961—2019年乌鲁木齐市暴雪进行统计分型，合成分析了各型暴雪过程的大尺度环流背景、高低层配置、动力触发机制和水汽输送特征，得到以下结论：

（1）1961—2019年乌鲁木齐市暴雪的发生频率呈每10 a增加0.3次的趋势，暴雪站点数也在不断增加具有明显准20 a振荡周期，呈现双峰特征。

（2）200~300 hPa高空偏南急流、500 hPa偏西或西南气流、700 hPa低空偏北急流、850 hPa西北气流及地面西南风与东北风辐合是乌鲁木齐市暴雪过程的必要环流配置，地面冷高压稳定维持，冷空气东移南下，对降雪有增幅作用。

（3）根据500 hPa环流形势，乌鲁木齐市暴雪的3种主要类型为：槽前西南气流型（Ⅰ型）、低槽（涡）东移型（Ⅱ型）和强锋区型（Ⅲ型），其中槽前西南气流型出现16次，低槽（涡）东移型出现17次、强锋区型出现20次，且以初冬和早春出现次数最多。引发暴雪的500 hPa环流差异在于Ⅰ型波长较长，相对移速慢，西南气流持续补充，暴雪维持时间长；而Ⅱ型波长较短，移速快，冷暖空气交汇剧烈，爆发性强，雪强更大；Ⅲ型由于北方冷槽（涡）底部偏西气流与偏南短波槽前西南暖湿气流汇合，锋区加强所致。

（4）乌鲁木齐市暴雪形成与加强的关键为较强的垂直环流及地形与锋面的强迫抬升。三型暴雪在乌鲁木齐市西侧均存在强上升气流，中高层受西风带影响，而后又在东侧下沉，强度与达到暴雪时间有较好对应；等θ_{se}线密集且陡立、500 ~ 600 hPa锋生强而深厚，同时锋面次级环流加强上升运动，亦有利于雪强增强。Ⅰ型较Ⅱ型、Ⅲ型中层暖湿气流持续补充使得强锋生维持，降雪时间长；Ⅱ型则因低层更强的冷空气楔入并受地形强迫在天山北坡堆积形成深厚“冷垫”使得锋面更陡立，锋生强，雪强大。

（5）乌鲁木齐市暴雪的水汽源地有高纬度巴伦支海，中纬度黑海、里海、咸海，低纬度阿拉伯海，水汽输送路径有西南、偏西和西北，由于环流配置不同水汽输送路径有所差异，主要以中低纬水汽输送为主。不同点在于Ⅰ型和Ⅱ型均为500 hPa水汽被西南气流直接输送至暴雪区上空，而Ⅲ型则是先由前期南支系统向北输送至巴尔喀什湖与里海、咸海水汽汇合，随后沿偏西气流向东输送引起水汽汇合且具有更强的水汽通量大值中心，当水汽辐合向低层集中且强度由最强减弱时的小时降雪强度达到最大。

参考文献（References）

[1] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 1956—2010年中国降雪特征变化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(4): 381-386, 393. [Zhang Danwu, Cong Zhentao, Ni Guangheng. Snowfall changes in China during 1956—2010[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(4): 381-386, 393.]

[2] 孙秀忠, 罗勇, 张霞, 等. 近46年来我国降雪变化特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1594-1601. [Sun Xiuzhong, Luo Yong, Zhang Xia, et al. Analysis on snowfall change characteristic of China in recent 46 years[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(6): 1594-1601.]

[3] 陈海山, 罗江珊, 韩方红. 中国北方暴雪的年代际变化及其与大气环流和北极海冰的联系[J]. 大气科学学报, 2019, 42(1): 68-77. [Chen Haishan, Luo Jiangshan, Han Fanghong. Interdecadal variation of heavy snowfall in northern China and its linkages with atmospheric circulation and Arctic sea ice[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42(1): 68-77.]

[4] 王遵娅, 周波涛. 影响中国北方强降雪事件年际变化的典型环流背景和水汽收支特征分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2654-2666. [Wang Zunya, Zhou Botao. Large-scale atmospheric

circulations and water vapor transport influencing interannual variations of intense snowfalls in northern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 2654−2666.]

[5] 付亮. 影响东北的北上温带气旋暴雪的统计特征和典型个例研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019. [Fu Liang. Statistical characteristics and a case study of snowstorms associated with northward extratropical cyclones in northeast China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.]

[6] 陈长胜, 王盘兴, 杨秀峰, 等. 东北地区暴雪天气的统计学划分方法及其时空分布特征[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1275−1281. [Chen Changsheng, Wang Panxing, Yang Xiufeng, et al. Classification and features of spatio-temporal variation of snowstorms in northeast China[J]. Science Geographic Sinica, 2012, 32(10): 1275−1281.]

[7] 周晓宇, 赵春雨, 崔妍, 等. 1961—2017年中国东北地区降雪时空演变特征分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 766−779. [Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Cui Yan, et al. Analyzing the characteristics of temporal and spatial evolution of snowfall in northeast China from 1961 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 766−779.]

[8] 高松影, 赵婷婷, 宋丽丽, 等. 辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 439−446. [Gao Songying, Zhao Tingting, Song Lili, et al. Transporting characteristics of snowstorm water vapor over Liaoning Province in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 439−446.]

[9] 阎琦, 崔锦, 杨青. 2018年辽宁两次雨转暴雪过程对比分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 944−953. [Yan Qi, Cui Jin, Yang Qing. Comparative analysis of two rain to snowstorm processes in Liaoning in 2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 944−953.]

[10] 李津, 赵思雄, 孙建华. 一次华北破纪录暴雪成因的分析研究[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(6): 683−698. [Li Jin, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Analysis of a record heavy snowfall event in north China[J]. Climate and Environmental Research, 2017, 22(6): 683−698.]

[11] 胡玲, 刘锦, 东高红, 等. 天津城区暴雪的环流形势与雷达特征分析[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(1): 34−42. [Hu Ling, Liu Jin, Dong Gaohong, et al. Analysis on the circulation situation and radar characteristics of snowstorm in Tianjin City[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2020, 43(1): 34−42.]

[12] 王丛梅, 李永占, 刘晓灵. 河北省南部回流暴雪天气结构特征[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(3): 23−28. [Wang Congmei, Li Yongzhan, Liu Xiaoling. Structural feature of return-flow snowstorm in southern Hebei Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(3): 23−28.]

[13] 陈雪珍, 慕建利, 赵桂香, 等. 华北暴雪过程中的急流特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1069−1075. [Chen Xuezhen, Mu Jianli, Zhao Guixiang, et al. Analysis of jet stream characteristic during the snowstorm in north China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 1069−1075.]

[14] 张俊兰, 崔彩霞, 陈春艳. 北疆典型暴雪天气的水汽特征研究[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1115−1125. [Zhang Junlan, Cui Caixia, Chen Chunyan. Study on water vapor characteristics of typical heavy snowstorm case in northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1115−1125.]

[15] 王勇, 赵战成, 晏军, 等. 新疆雪灾的时空分布特征及其等级划分[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 577−583. [Wang Yong, Zhao Zhancheng, Yan Jun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and its classification of snow disaster in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 577−583.]

[16] 田亚林, 李雪梅, 李珍, 等. 1980—2017年天山山区不同降水形态的时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 308−318. [Tian Yalin, Li Xuemei, Li Zhen, et al. Spatial and temporal variations of different precipitation types in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 308−318.]

[17] 庄晓翠, 李博渊, 李如琦, 等. 新疆北部强降雪天气研究若干进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 1−8. [Zhuang Xiaocui, Li Boyuan, Li Ruqi, et al. Some advances on study of strong snowfall in northern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(1): 1−8.]

[18] 杨莲梅, 杨涛, 贾丽红, 等. 新疆大~暴雪气候特征及其水汽分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 389−396. [Yang Lianmei, Yang Tao, Jia Lihong, et al. Analysis of the climate characteristics and water vapor of heavy snow in Xinjiang Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 389−396.]

[19] 万瑜, 窦新英. 新疆中天山一次城市暴雪过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 8−14. [Wan Yu, Dou Xinying. Diagnostic analysis of an urban snowstorm process in the middle of Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(6): 8−14.]

[20] 张俊兰, 万瑜, 闵月. 乌鲁木齐"2015·12·11"极端暴雪天气的综合分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(1): 1−10. [Zhang Junlan, Wan Yu, Min Yue. Comprehensive analysis of an extreme blizzard in Urumqi on December 11th, 2015[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(1): 1−10.]

[21] 庄晓翠, 李健丽, 李博渊, 等. 天山北坡2次暴雪过程机理分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 29−38. [Zhuang Xiaocui, Li Jianli, Li Boyuan, et al. Mechanism analysis of two class blizzard process in the north slope of Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(1): 29−38.]

[22] 牟欢, 赵丽, 孙硕阳, 等. 天山北麓两次暴雪天气对比分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1262−1272. [Mu Huan, Zhao Li, Sun Shuoyang, et al. Comparative analysis of two blizzard weather mechanisms in the northern piedmonts of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1262−1272.]

[23] 肖开提·多莱特. 新疆降水量级标准的划分[J] .沙漠与绿洲气象, 2005, 28(3): 7−8. [Duolaite Xiaokaiti. Classification of precipitation magnitude standard in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2005, 28(3): 7−8.]

Circulation classification and cause analysis of the snowstorm case in Urumqi City from 1961 to 2019

LI Anbei[1,2], WAN Yu[1], ZHANG Jun[1], LI Ruqi[1], Mangsuer AIRETI[1], LI Na[1]

(1. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract: The area along the northern slope of the Tianshan Mountains has a high incidence of snowstorms in northern Xinjiang, China. As one of the main cities, Urumqi City has essential research value. Our research is based on the daily precipitation data of five national weather stations in Urumqi City during the snowfall period from 1961 to 2019 (November to March of the following year) and NCEP reanalysis data of 0.25°×0.25° and 1°×1° 4 times a day. Fifty-three times the characteristics of the snowstorm process and the large-scale circulation background are analyzed and summarized. Additionally, the Urumqi City snowstorm impact system is classified. Furthermore, the high and low altitude configurations of different types of snowstorms are synthesized and analyzed to obtain the structural characteristics of various systems. The results are as follows. (1) The frequency of snowstorms in Urumqi City increased by 0.3 times·$(10a)^{-1}$, with a quasi-20-year oscillation period and the highest frequency of occurrence in March (40%), followed by November (32%). (2) The snowstorm in Urumqi City is divided into southwest airflow in front of the trough, eastward movement of the upper-altitude trough, and strong front area. The strong front area has the highest proportion, but the snowfall is small. The southwest airflow in front of the trough lasts for a long time, and the snowfall is the largest. The east-moving type is the least. Meanwhile, the affected area is larger, and the snow intensity is stronger. (3) The main impact systems of the snowstorm in Urumqi City are 300 hPa polar front jet, 500 hPa west or southwest airflow, 700 hPa low altitude northerly jet, and 850 hPa northwest. (4) The mechanism of the formation of the Urumqi City snowstorm is that the low-level northerly airflow meets the mountain accumulation to force the warm and humid air to uplift to form a “cold cushion”, and form a strong vertical wind shear and a deep frontogenesis zone with the southwest airflow above 500 hPa. However, the causes of the snowstorm are different due to the difference in the duration of the strong frontogenesis and front slope and extension height of the three processes. (5) The water vapor transport of the snowstorm is mainly southwest, west and northwest, and the southwest airflow pattern and high altitude in front of the trough. The eastward trough type is guided by the southwest airflow and is directly transported to the sky over the snowstorm area. In contrast, the strong front type is transported by the relay of water vapor to form a water vapor confluence. We summarized the system structure characteristics of Urumqi City snowstorm weather caused by different influence systems. Consequently, we obtained that there are significant differences. Further research can improve the understanding of the evolution process of snowstorms along the Tianshan Mountains in northern Xinjiang. By combing forecast ideas, we can provide effective forecast services reference basis.

Key words: snowstorm; circulation classification; frontogenesis function; water vapor transport; Urumqi City